

## Artículo de investigación

**Mathematical and computer models of the change of the parameters of the grain layer during the movement of the grain through the microwave and convection zone**

Modelos matemático y computarizado del cambio de los parámetros de la capa de grano durante el movimiento del grano por la zona de microondas y convección  
Modelos matemáticos e computarizados da mudança dos parâmetros da camada de grão durante o movimento do grão através da zona de microondas e convecção

Recibido: 15 de febrero de 2019. Aceptado: 30 de marzo de 2019

Written by:

**Alexey A. Vasilyev**<sup>53</sup>

elibrary.ru: AuthorID: 736491

ORCID iD: 0000-0003-3147-659X

Researcher ID : E-8003-2019

**Andrey A. Tsimbal**<sup>53</sup>

elibrary.ru: AuthorID: 984474

ORCID: 0000-0002-0305-6347

**Alexey N. Vasilyev (Corresponding Author)**<sup>53</sup>

elibrary.ru: AuthorID: 203808

ORCIDiD: 0000-0002-7988-2338

ResearcherID: H-3641-2017

Scopus Author ID: 57193499690

Scopus Author ID: 57204163721

**Irina G. Ershova**<sup>53</sup>

elibrary.ru: AuthorID: 674483

ORCIDiD: 0000-0003-1126-3837

ResearcherID: E-6984-2019

Scopus Author ID: 7003723608

**Alexander A. Belov**<sup>53</sup>

elibrary.ru: AuthorID: 759460

ORCIDiD: 0000-0002-9216-9852

ResearcherID: E-8034-2019

**Abstract**

In the process of drying the grain in a dense layer in motion, the grain moves through the grain dryer. The movement of the grain layers is usually uneven. In addition, it is likely that the temperature and consumption of the desiccant agent will not remain the same throughout the height of the drying zone. The specific power of the microwave field in the drying zone can also alter. All these factors affect the speed and uniformity of drying of the grain layer throughout the drying zone.

In the first stage, an analysis of the theoretical studies on the subject was carried out. It was determined that to date there has not been

**Resumen**

En el proceso de secado del grano en una capa densa en movimiento, el grano se mueve en la secadora de grano. El movimiento de las capas de grano suele ser desigual. Además, es probable que la temperatura y el consumo del agente desecante no permanezcan iguales a lo largo de la altura de la zona de secado. La potencia específica del campo de microondas en la zona de secado también puede alterar. Todos estos factores afectan la velocidad y la uniformidad de secado de la capa de grano en toda la zona de secado.

En la primera etapa, llevamos a cabo un análisis de los estudios teóricos sobre el tema. Hemos

<sup>53</sup> Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM"; the 1-th Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation. vasilyev-viesh@inbox.ru

presented any work in which mathematical models of heat and humidity exchange in a dense layer of grain in motion with consideration of the relative vertical movement of the layers. Therefore, it is necessary to develop such a mathematical model.

As an initial configuration for the development of a mathematical description of the drying process, it was deemed appropriate to use the configuration of the microwave and convection zone developed by the authors.

The equal probability of combination of parameters of the desiccant agent temperature, its relative humidity, the velocity and distance from the caryopsis to the waveguide was assumed. From this point, we developed a computerized microwave and convection drying model that takes into account this type of change in the parameters.

The results of the grain drying simulation demonstrated the efficiency of the computer model obtained, reflecting the influence of fluctuations in grain parameters and the microwave field in the drying process.

To evaluate the accuracy of the obtained model, it is necessary to carry out experimental studies.

**Keywords:** desiccant agent, grain layer; mathematical model, computer model caryopsis, microwave and convection drying.

determinado que hasta la fecha no se han encontrado trabajos en los que se presenten modelos matemáticos de intercambio de calor y humedad en una capa de grano densa en movimiento con consideración del movimiento vertical relativo de las capas. Por lo tanto, es necesario desarrollar tal modelo matemático.

Como configuración inicial para el desarrollo de una descripción matemática del proceso de secado, consideramos conveniente utilizar la configuración de la zona de microondas y convección desarrollada por los autores.

Se supuso la probabilidad igual de combinación de parámetros de la temperatura del agente desecante, su humedad relativa, la velocidad y la distancia de la caryopse a la guía de ondas. A partir de ello, desarrollamos un modelo computarizado de secado por microondas y convección que toma en consideración este tipo de cambio en los parámetros.

Los resultados de la simulación de secado de grano demostraron la aptitud del modelo computarizado obtenido, reflejando la influencia de las fluctuaciones en los parámetros de grano y el campo de microondas en el proceso de secado. Para evaluar la precisión del modelo obtenido, es necesario realizar estudios experimentales.

**Palabras claves:** agente desecante, capa de grano, modelo matemático, modelo computarizado, secado por microondas y convección.

## Resumo

No processo de secagem do grão em uma camada densa em movimento, o grão se move no secador de grãos. O movimento das camadas de grãos é geralmente irregular. Além disso, é provável que a temperatura e o consumo do agente de secagem não permaneçam os mesmos ao longo da altura da zona de secagem. A potência específica do campo de microondas na zona de secagem também pode ser alterada. Todos esses fatores afetam a velocidade e a uniformidade de secagem da camada de grãos em toda a zona de secagem. Na primeira etapa, realizamos uma análise dos estudos teóricos sobre o assunto. Determinamos que até hoje não houve trabalhos em que modelos matemáticos de troca de calor e umidade em uma camada de grão denso em movimento são contemplados considerando o movimento vertical relativo das camadas. Portanto, é necessário desenvolver um modelo matemático desse tipo.

Como configuração inicial para o desenvolvimento de uma descrição matemática do processo de secagem, consideramos conveniente utilizar a configuração da zona de microondas e convecção desenvolvida pelos autores.

A probabilidade igual de combinação de parâmetros de temperatura do agente dessecante, sua umidade relativa, a velocidade e a distância entre o caryopse e o guia de ondas foi assumida. A partir disso, desenvolvemos um modelo computadorizado de secagem por microconvecção e convecção que leva em conta esse tipo de mudança nos parâmetros.

Os resultados da simulação de secagem de grãos demonstraram a adequação do modelo computacional obtido, refletindo a influência das flutuações nos parâmetros de grãos e do campo de microondas no processo de secagem.

Para avaliar a precisão do modelo obtido, é necessário realizar estudos experimentais.

**Palavras-chave:** agente dessecante, camada de grão, modelo matemático, modelo computado, secagem em microondas e convecção.

## Introduction

Durante el secado de grano en una densa capa móvil, estos se mueven en la secadora de granos. El movimiento de distintas capas de grano suele ser desigual, moviéndose unas partes de la capa de grano más rápido, y otras más lento. Se produce el desplazamiento de las cariopses en la capa tanto vertical como horizontal, debido a lo cual se cambian las condiciones de intercambio de calor y de humedad entre el agente desecante y el grano. Además, es probable que la temperatura y el consumo del agente desecante no permanezcan iguales a lo largo de la altura de la zona de secado. La potencia específica del campo de microondas en la zona de secado también puede alterar. Todos estos factores afectan la velocidad y la uniformidad de secado de la capa de grano en toda la zona de secado. Por lo tanto, consideramos necesario e importante el objetivo de desarrollar un modelo matemático de secado por microondas y convección de grano cuando se mueve en la zona de secado.

### Análisis de los modelos matemáticos existentes del secado de grano en una capa en movimiento

En la primera etapa de las investigaciones hemos llevado a cabo un análisis de trabajos teóricos sobre el tema. El movimiento de la capa de grano en secadoras de granos fue objeto del trabajo de una serie de autores, tales como Mukhanov N.V., Marchenko S.A., Voronkov V.V., Shevyakov A.N. y Tikhonov E.A., 2016; Barrozo, MAS; Henrique, HM; Sartori, DJM; con coautores, 1999; Azmir, Jannatul; Hou, Qinfu; Yu, 2018. Se prestó especial atención a la interacción del grano con las superficies inclinadas de las cámaras de secado y bases cónicas, siendo el grano representado no como un objeto separado, sino como un material granular polidisperso debido a la diferencia en las dimensiones geométricas de los cariopses. Volkhonov M.S. (2007) investigó

las fuerzas que actúan sobre el grano durante el secado aerodinámico en los canales. Se presentan tres opciones típicas de movimiento del grano: primera, cuando la fuerza de gravedad que actúa sobre el grano es mayor que el componente vertical de la acción de la fuerza del flujo de aire; segunda, cuando es igual al componente vertical de la acción de la fuerza del flujo de aire; tercera, cuando es menor que el componente vertical de la fuerza del flujo de aire. Teniendo en cuenta estas fuerzas, se formuló el problema de valor de frontera inicial y, como resultado de las transformaciones realizadas, se obtuvo una expresión analítica del movimiento del grano a lo largo de una superficie inclinada en la zona activa de la cámara de secado de una secadora de granos de recirculación de tipo búnker. La dependencia resultante se puede usar para describir el movimiento del grano solo a lo largo de los bordes de los conductos de distribución de aire en la zona de convección y microondas, por lo tanto, no correspondiendo a nuestras metas.

En el trabajo de Churinova M.S (2017) se demostró la necesidad de tener en cuenta la no linealidad y la distribución en el estudio del proceso de secado del grano, las cuales fueron utilizadas e implementadas por la autora para resolver los problemas de control y elección de modos y parámetros de la secadora de granos. En los trabajos de Kolesov L.V. y Manasyan S.K. (1989) y Chine-Polito (2016) se describió el enfoque de la descripción de simulación de la dinámica no lineal del proceso de secado del grano.

El modelo no lineal del proceso de secado en una capa móvil densa fue creada con el uso de los métodos de balance de materia (Andrianov N.M., 2005). Las ecuaciones de la dinámica del proceso de trabajo tienen la siguiente forma:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} = -k_w \theta((t - \tau), (x - v\tau)) w(t, x); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + v \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{r}{c} \left( \frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \alpha \left[ 1 - k_\alpha \left( \frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] (T_0 - \theta(t, x)) \quad (2)$$

$$w(t, 0) = w(t), \theta(t, 0) = \theta(t), \\ w(0, x) = w(x), \theta(0, x) = \theta(x),$$

siendo  $w = w - w_0$ ;  $\theta = \theta_s - \theta_0$ ;  $T = \theta_{c.a.} - T_0$  el valor actual promedio de, respectivamente, la humedad; temperatura de grano; temperatura del agente desecante;  $k_w$  el coeficiente del intercambio de calor y humedad interior, m/s;

$k_\alpha$  el coeficiente equivalente de intercambio de calor entre el grano y el agente desecante, m/s;  $\alpha$  el coeficiente que caracteriza la dependencia de la intensidad de intercambio de humedad entre el grano y el agente desecante en función de la velocidad de evaporación de humedad;

$\tau$  el tiempo de activación de la eliminación de humedad (en la implementación numérica, su valor fue imitado mediante la introducción al sistema (1) – (2) de las variables  $w_0$  y  $w(x)$  intermedias entre  $w_1(x)$ , ...,  $w_5(x)$  que representan ecuaciones lineales diferenciales con el coeficiente  $k_3$  en dependencia de  $\tau$ ), h;  
 $r$  el calor de vaporización, kJ/kg;  
 $c$  la capacidad calorífica específica del grano, kJ / (kg °K);  
 $v$  la velocidad de movimiento del grano, m/s;  
 $t, x$  las coordenadas de tiempo y espacio, m.

Este sistema de ecuaciones es adecuado para cálculos en modo estacionario, cuando los parámetros iniciales del grano y el agente desecante son constantes, los parámetros de la capa de grano cambian solo en función de las coordenadas del espacio y en cualquier punto de la cámara de secado toman valores constantes. Esta opción es difícil de implementar en instalaciones reales, por lo que continuamos considerando otros enfoques para el desarrollo de un modelo matemático.

En los libros de Antipov S. T. y Nesterov D. A. (2016) se investiga el proceso de secado de grano de mijo por microondas en una capa suspensa retorcida. El modelo de este proceso se basa en dos componentes: el movimiento de dos medios diferentes (medio gaseoso – portador de calor, y medio granular - grano de mijo) que interactúan entre sí y con las superficies de trabajo de la cámara de secado, y los procesos de transferencia de masa y calor en los granos de mijo. Los autores prestaron especial atención al proceso de interacción entre el grano y el aire.

Para simular el comportamiento del sistema de granos de mijo como un medio granular fue utilizado el método de dinámica de partículas, ampliamente aplicado en varias ramas de la ciencia y la tecnología. El método consiste en resolver las ecuaciones de movimiento de un conjunto de partículas individuales esféricas simétricas (granos de mijo) que se someten a la acción de la fuerza de las partículas vecinas, el flujo del portador de calor y las paredes de la cámara de secado. Las ecuaciones básicas que describen el comportamiento mecánico de un medio son las ecuaciones de Navier-Stokes. Por lo tanto, los autores optaron por llevar a cabo su solución numérica utilizando el método de discretización espacial y los esquemas de diferencias finitas (Mironov M.A., 2010).

En el trabajo de Tishaninov K.N. (2015) fue desarrollada la teoría de interacción de partículas del flujo de grano. Se ha desarrollado un modelo

informático del flujo de grano, destinado a realizar experimentos de simulación y crear un laboratorio virtual para investigaciones. Este modelo no considera la opción de movimiento de una capa de grano densa.

En los trabajos de Chebotarev V.P. (2014), Khachatourian, O. A. Vielmo, H. A. y Bortolaia, L. A. (2013) se presenta el desarrollo de un modelo de simulación para estudiar el cambio en los parámetros del proceso de secado de la capa de grano en movimiento por el flujo de agente desecante de varias direcciones en relación al flujo de grano. Se tomaron de base los modelos para el secado de capa de grano inmóvil. Se supone que en la capa de grano a través de la cual pasa el flujo transversal del agente desecante se producen procesos similares de transferencia de calor y transferencia de materia, siendo válidas para ellos las mismas regularidades que para una capa de grano inmóvil.

Se obtuvieron sistemas de ecuaciones similares para el caso cuando el agente desecante y la capa de grano se mueven en contracorriente.

Como se señaló anteriormente, la principal dificultad para describir el proceso de secado de una capa de grano en movimiento es el cambio en la posición relativa de las capas verticales de grano a lo ancho de la zona de secado. El enfoque explicado arriba no describe adecuadamente el intercambio de calor y humedad en la capa de grano bajo tales condiciones.

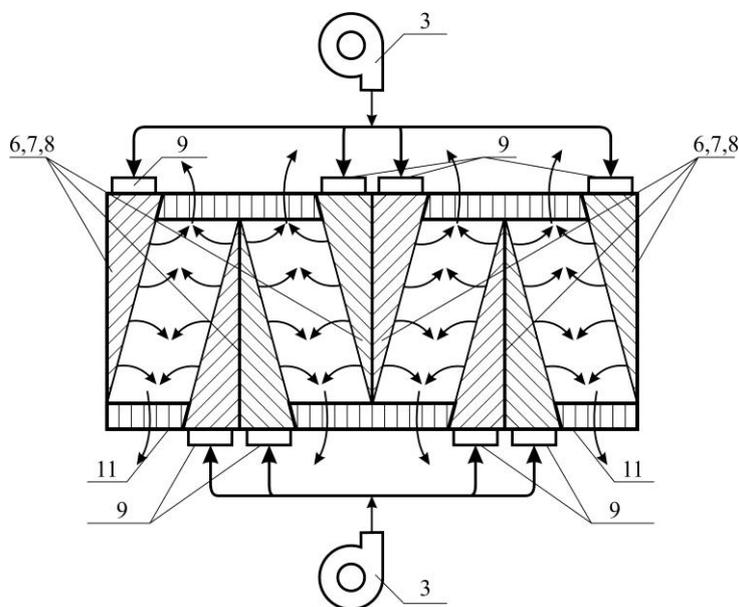
Los investigadores Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Britikov D.A. y Tertychnaya T.N. (2009) utilizaron el criterio de similitud termodinámica para desarrollar un sistema adimensional de ecuaciones diferenciales ordinarias que se resolvió mediante el método de Runge-Kutta del cuarto orden de precisión. La solución permite obtener los valores de humedad y temperatura de la capa de grano en movimiento. Sin embargo, el problema del desplazamiento vertical de las capas entre sí tampoco se ha logrado resolver en este modelo.

Lo descrito anteriormente nos permitió concluir que en la actualidad no existe ninguna investigación que presente modelos matemáticos de intercambio de calor y humedad en una capa de grano densa en movimiento con consideración del movimiento vertical relativo de las capas. Por lo tanto, es necesario desarrollar tal modelo matemático.

### Desarrollo de los modelos matemático e informático de secado de grano por microondas y convección en una capa móvil.

Para crear un modelo matemático de este tipo, es necesario saber la trayectoria exacta de

movimiento del grano en la zona de secado. Para ello, consideramos oportuno tomar la configuración de la zona de microondas y convección utilizada por el punto de referencia para la investigación. Su vista superior se representa en la Fig. 1



3 – ventiladores; 6, 7, 8 – guías de ondas, estructuralmente combinadas con los conductos de aire; 9 – magnetrones con módulos de alimentación; 11 – paredes perforadas

Figura 1 – Zona de microondas y convección, vista superior

Las guías de ondas del campo de microondas se combinan estructuralmente con los conductos de aire que se encuentran por encima de las guías de ondas. Los conductos de aire y las guías de onda se fabrican en forma de pirámides triangulares. Uno de los pares de guías de onda es el conducto con el borde más alto y está conectado al otro par de este tipo, formando una pirámide triangular con base cuadrada. Para proporcionar un procesamiento de grano uniforme, las guías de onda en la zona de microondas y convección están dispuestas en varias capas.

Esta disposición hace que sea muy difícil predecir el movimiento tanto de las capas de grano como de los granos individuales a lo largo de la altura de la zona de secado. El análisis del diseño de la zona de microondas y convección permite suponer que el movimiento del grano en ella es similar al movimiento del grano al descargar búnkeres (Mellmann, Jochen; & Hoffmann, Thomas, 2014).

El movimiento de cuerpos granulares en las cavidades de los búnkeres puede ser hidráulico, normal o mixto (Gyachev P.V., 1992; Bogomyagkih V.A. y Pepchuk A.P., 1996). Con el primer tipo de movimiento no se forma

embudo en la superficie del cuerpo granular, con el segundo, sí se forma, y con el tipo mixto de movimiento del cuerpo granular, por regla general, ocurre la transición del tipo de movimiento hidráulico al normal, pero a veces pasa al revés.

El tipo de movimiento del cuerpo granular en el búnker depende de sus propiedades físicas y mecánicas y de las propiedades de fricción de las paredes y del fondo del búnker, así como de los parámetros de forma y diseño del búnker.

El propósito principal de los cálculos del flujo de materiales granulares de los búnkeres consiste en determinar y garantizar el flujo máximo. En este tipo de objetivos no se consideran en absoluto las cuestiones de la velocidad y la trayectoria del movimiento de un solo grano hacia la el orificio de salida. Al mismo tiempo, la grabación de alta velocidad del proceso de salida del material granular demuestra (Bogomyagkih V.A. y Pepchuk A.P., 1996) que es un proceso complejo. En la grabación de video de la dinámica del movimiento de las capas de grano después de abrir la salida del búnker, es claramente visible el desplazamiento desigual de las capas entre sí en el área de la salida. A medida que el grano se

mueve hacia abajo, aumenta el desplazamiento de las capas en relación con el posicionamiento inicial en relación a otras capas. Con este movimiento, el grano se mezcla, se pierde la percepción de la capa de grano como un elemento permanente que mantiene una orientación espacial bastante estable durante todo el período de secado.

Las investigaciones que se llevan a cabo (Fedoseev V.B., Gordeeva A.B. y Kunakov V.S., 2005) muestran que el contenido de humedad del material granular afecta significativamente su velocidad dentro de búnkeres. El grano entra en la secadora de granos a una humedad de 18-35%, reduciendo esta el proceso de secado al 14%. En diferentes partes de la cámara de secado, la irregularidad del secado del grano puede ser de un 2-3%, lo cual afecta la velocidad de movimiento de los granos. La irregularidad del secado del grano en la zona de secado depende de la uniformidad de distribución del campo de microondas y del aire, siendo individuales para cada diseño de la zona de secado.

Las guías de onda y los conductos se ubican en la zona de microondas y convección de tal manera

que se supone una mezcla uniforme del grano a medida que se mueve de arriba a abajo. En este caso, la distancia del grano a la guía de ondas  $L$  puede estar en el rango de 1 a 15 cm, la velocidad del agente desecante  $V$  en varios puntos del núcleo puede variar en el rango de 0.2 a 0.6 m/s, la temperatura del agente desecante  $T$  varía en el rango de 50...60, y la humedad relativa del agente desecante en el proceso de saturación con humedad, en el rango de 10...60%. Si aceptamos el supuesto de la probabilidad igual de combinación de diferentes ajustes de la temperatura del agente desecante, su humedad relativa, la velocidad y la distancia de la carioipse a la guía de ondas, se puede desarrollar un modelo computarizado de microondas y convección que considere tal cambio en los parámetros. En este caso, el modelo matemático del proceso de secado se puede representar mediante dos ecuaciones en forma de funciones de transferencia (Ospanov A.B., Vasilyev A.N., Budnikov D.A., Karmanov D.K., Vasilyev A.A. et al., 2014; Vasilyev A.N., Budnikov D.A., Vasilyev A.A., Rotachev Yu.Yu. y Gusev V.G., 2014; Vasilyev A.N., Budnikov D.A. y Vasilyev A.A., 2017):

$$\theta(p) = (\theta_0 - T(p)) \frac{1}{T_1 p + 1} + \theta_0 + A_5 W(p) p + A_5 W_0 + \frac{1}{p} A_6 Q_v \quad (3)$$

$$W(p) = W_p \frac{K}{p + K}, \quad (4)$$

siendo  $\theta$  la temperatura del grano, °C;  $\theta_0$  la temperatura inicial del grano, °C;  $W$  la humedad del grano, %;  $W_0$  la humedad inicial del grano, %;  $W_p$  la humedad en el estado del proceso de intercambio de calor y humedad equilibrado, %;  $T$  la temperatura del aire (agente desecante, °C;  $T_1$  la constante de tiempo, s;  $Q_v$  la potencia del campo microondas en la carioipse por unidad de volumen, kJ/m<sup>3</sup>;  $K$  el coeficiente de secado que considera la influencia de los parámetros del agente desecante, el grano y la potencia específica del campo microondas sobre la velocidad de secado, 1/h;  $A_5, A_6$  los coeficientes que dependen de los parámetros de grano;  $T(p)$

la representación de Laplace de la temperatura del agente desecante;  $W(p)$  la representación de Laplace de la humedad del grano;  $p$  – operador de Laplace.

Las investigaciones anteriores (Ospanov A. B., Budnikov D. A., Karmanov D. K., Vasilyev A. A., Baimuratov D.Sh., Toksanbaeva B.O. y Shalginbaev D. B., 2017; Vasilyev, A.N., Budnikov, DA, Gracheva, N.N. y Severinov O.V., 2016) permitieron crear ecuaciones para calcular la potencia específica y la relación de secado:

$$K = 0,606T^{0,162} + 1,155V^{0,183} - 7,429W^{-0,493} + 1550Q_v^{-1}, \quad (5)$$

$$Q_v = 5778 - 14,92W - 846,2L + 0,2332W^2 - 3,727WL + 42,74L^2. \quad (6)$$

Estas ecuaciones se utilizaron en el modelo computarizado Simulink del secado del grano por microondas y convección durante su movimiento por la zona activa (Fig. 2).

El módulo consiste de dos bloques principales: 1 - bloque de control de temperatura de grano; 2 - bloque de modelación del secado de grano. En el Bloque 1 se modela el calentamiento del grano mediante el campo de microondas. Tras calentar

el grano a 55°C el suministro del campo de microondas se para, tras bajar la temperatura del grano a 53°C el calentamiento por microondas se restablece. La activación/desactivación de los magnetrones se modela utilizando los bloques Relay.

En el segundo bloque, los parámetros del grano y el agente desecante se configuran utilizando los bloques Uniform Random Number que generan una señal aleatoria uniformemente distribuida que caracteriza los parámetros del agente desecante y la distancia entre los granos y la guía de onda. Se toma un intervalo de tiempo de

presencia de una cariopse en un mismo lugar de 3 minutos. Durante este tiempo, la distancia a la guía de onda no cambia, no cambiando tampoco, por consiguiente, los parámetros del agente desecante. Después de 3 minutos, moviéndose de arriba a abajo, el grano se sitúa en una posición diferente, lo cual conduce a un cambio en los parámetros del agente desecante y el campo de microondas que actúa sobre él., El cálculo se realiza utilizando las ecuaciones (6) y (5) con la ayuda de los bloques Qv y K. Estos valores también cambian después de 3 minutos de secado de los granos, ya que dependen de su ubicación.

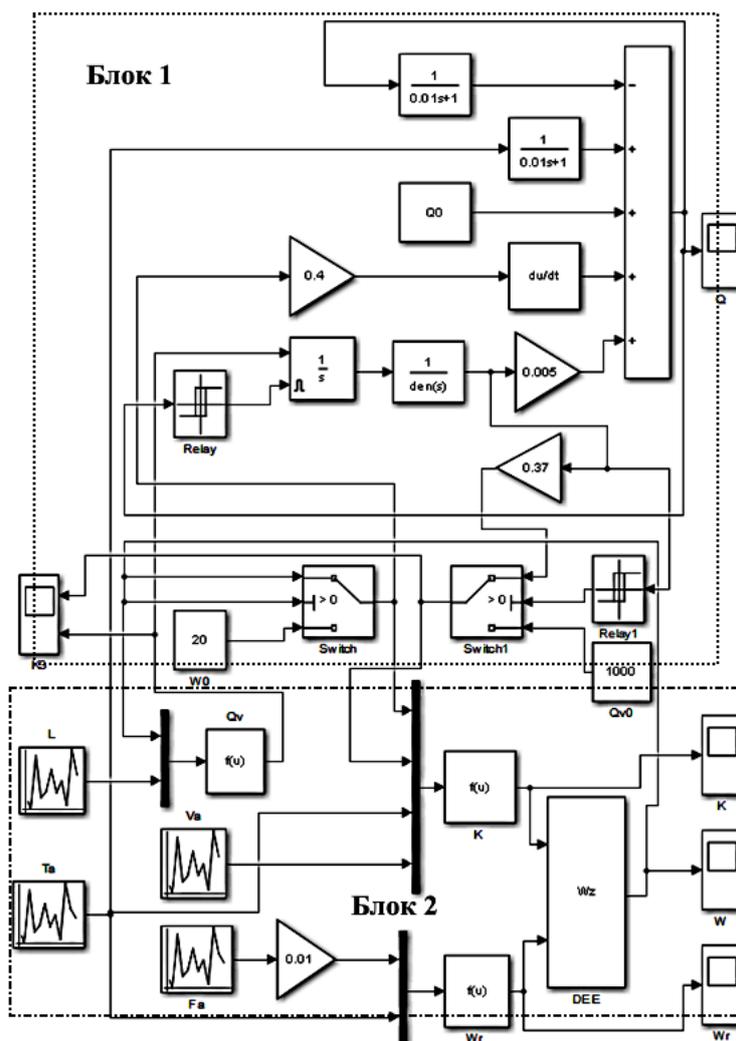


Figura 2 - Modelo computarizado Simulink del secado del grano por microondas y convección durante su movimiento por la zona activa

**Resultados de la modelación**

Los resultados de la modelación del secado del grano con la humedad inicial del 18, 22 y 26% se presentan en las figuras 3...6.

En la Fig. 3 se presentan las curvas de secado de grano obtenidas. Son idénticas a las curvas de secado obtenidas durante la modelación del proceso de escado por microondas y convección en una capa de grano densa e inmóvil.

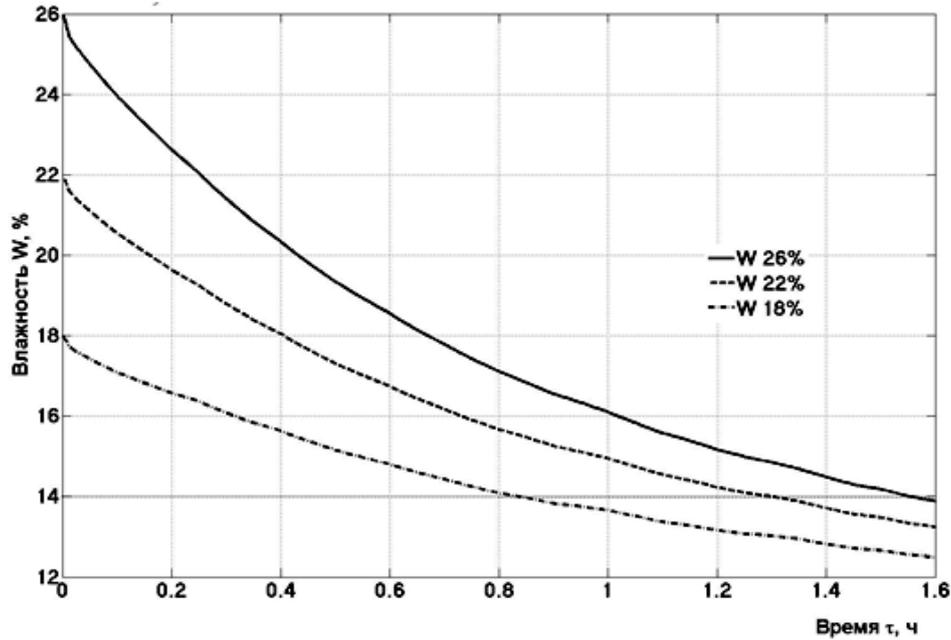


Figura 53 – Curvas de secado de grano obtenidas tras la modelación

En la Fig. 4a se presentan los gráficos de cambios en la potencia específica del campo de microondas que actúa sobre la cariopse

directamente en la capa de grano, y en la Fig. 4b - en la salida del bloque Qv.

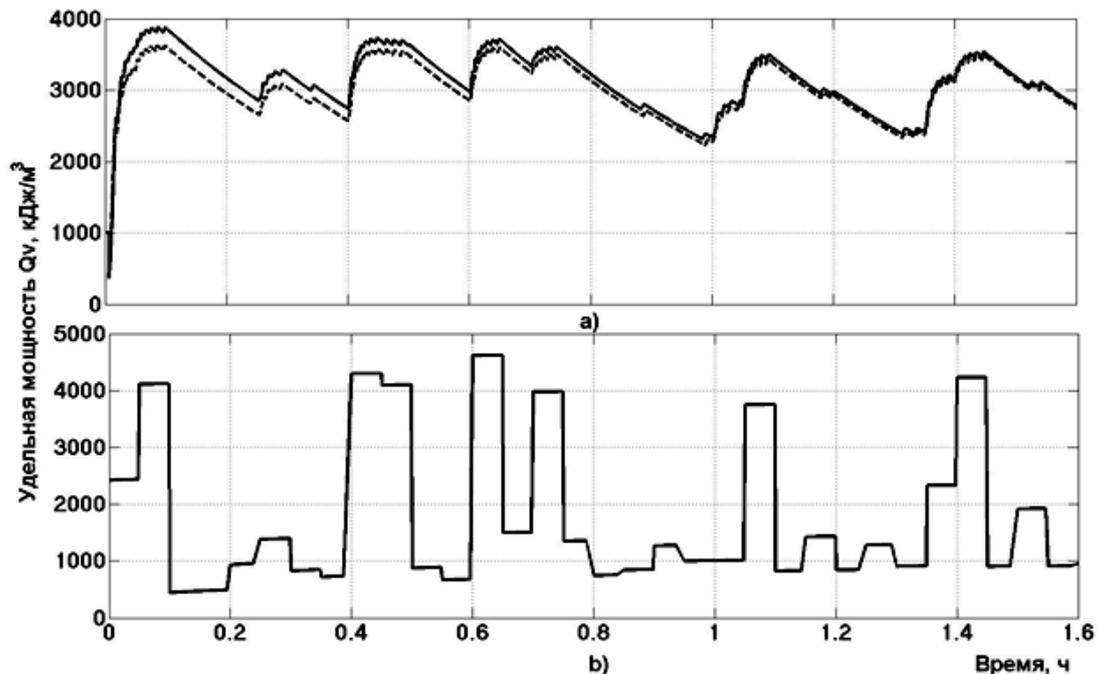


Figura 4 - Gráficos de cambios en la potencia específica del campo de microondas:  
a) que actúa sobre la cariopse directamente en la capa de grano; b) en la salida del bloque Qv

El carácter de los gráficos permite concluir que el regulador de la temperatura de calentamiento del grano de dos posiciones sirve de un tipo de filtro de la no linealidad considerable del campo de microondas en la capa de grano.

Los gráficos del cambio en la temperatura del grano (Fig. 5) muestran que las explosiones de temperatura ocurren con el aumento en la potencia específica del campo de microondas. Esto se da cuando la cariopse se acerca a la guía de onda. En general, la temperatura de

calentamiento no excede el rango permisible que permite evitar la degradación de las cualidades tecnológicas del grano.

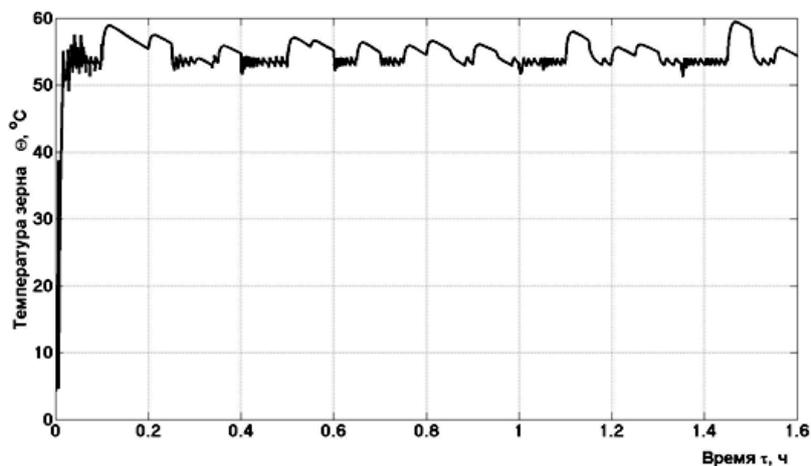


Figura 5 – Gráficos del cambio en la temperatura del grano

En la Fig. 6 se representa claramente el rango de cambios en el coeficiente de secado del grano en la zona de microondas y convección.

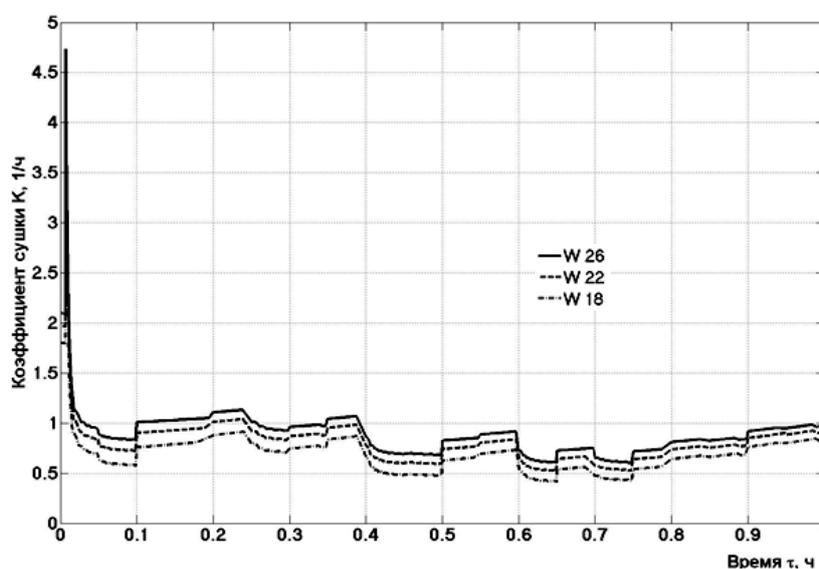


Figura 6 – Gráficos de cambio en el coeficiente de secado del grano en la zona de microondas activa durante el secado

Al comienzo del secado su valor es de 4,7 1/h, luego disminuyendo drásticamente y permaneciendo durante todo el tiempo de secado dentro del rango de 0,5...1,2 1/h según en qué parte de la zona de microondas y convección se encuentre la cariopse.

La evaluación de la adecuación de los resultados de la simulación puede ser obtenida tras compararlos con los resultados de estudios experimentales.

### Conclusiones

Como resultado de la investigación, hemos hecho las siguientes conclusiones:

- Los modelos matemáticos existentes de secado de grano en una capa en movimiento no tienen en cuenta los cambios en los parámetros del agente desecante y el campo de microondas durante el movimiento de la cariopse.
- Los resultados de los estudios del movimiento del grano al salir de los búnkeres muestran que

las capas de grano están desplazando y mezclando, lo que debe tenerse en cuenta al modelar el proceso de secado.

– Si aceptamos el supuesto de la probabilidad igual de combinación de parámetros del agente desecante y el campo de microondas en la zona de secado, es posible simplificar el modelo matemático de secado de grano en la capa en movimiento.

– El modelo computarizado desarrollado de secado de grano en movimiento por la zona de microondas y convección refleja el curso del proceso y permite cambiar todos los parámetros necesarios que caracterizan la dinámica del secado.

– Para una evaluación de la adecuación de los resultados de modelación obtenidos es necesario realizar estudios experimentales y comparar sus resultados con los resultados de la modelación.

### Referencias

Andrianov N.M. (2005). Optimización de las secadoras de granos y sus sistemas de control / Manuscrito No. 197-B200 depositado el 10 de febrero de 2005.

Antipov S. T. y Nesterov D. A. (2016). Descripción matemática del proceso de secado de granos de mijo en un aparato con un modo hidromecánico activo. Herald VSUIT, № 3. 77-81.

Azmir, Jannatul; Hou, Qinfu; Yu, (2018). Aibing Simulación de partículas discretas de secado de granos alimenticios en un lecho fluidizado. Tecnología en polvo. Volumen: 323. 238-249 Publicado: ENE 2018..

Barrozo, MAS; Henrique, HM; Sartori, DJM; con coautores. (1999). Secado de semillas de soja en un lecho móvil de flujo cruzado. Revista canadiense de ingeniería química Volumen: 77 Is-sue: 6. 1121-1126 Publicado: DIC 1999.

Bogomyagkih V.A. y Pepchuk A.P. (1996). Intensificación de la descarga de dispositivos de búnker en las condiciones de granulación de materiales granulados - Zernograd, VNIPTIMESH.

Chebotarev V.P. (2014). Estudio analítico del proceso de secado de una capa elemental móvil de grano / Mecanización y electrificación de la agricultura. Colección temática interdepartamental. Número 48 en 2 volúmenes. Volumen 1. Minsk. 119-125.

Chine-Polito, (2016). Modelización Industrial. Tecnología en marcha. Volumen: 29 Número: 1. 62-73 Publicado en: JAN-MAR 2016.

Churinova M.S. (2017). Contabilidad y uso de la no linealidad y distribución de los parámetros del proceso de secado del grano / Boletín de la

Universidad Agraria Estatal de Omsk No. 1 (25). 126-131.

Fedoseev V.B., Gordeeva A.B. y Kunakov V.S. (2005). La tasa de flujo de grano desde el bunker ko-nical. Noticias de la universidad. Región del Cáucaso Norte. Ciencias naturales Aplicación. No. 8. 18-24.

Gyachev P.V. (1992). Fundamentos de la teoría de Bunker. Novosibirsk: Editorial de la Universidad de Novosibirsk.

Khatchaturian, O. A.; Vielmo, H. A. ; & Bortolaia, L. A. (2013). Modelado y simulación de secadoras de grano de flujo cruzado. Ingeniería de biosistemas Volumen: 116 Número: 4. 335-345 Publicado: diciembre de 2013.

Kolesov L.V. y Manasyan S.K. (1989). Modelización matemática del proceso de secado de grano en plantas de secado / Control automático y sistema de alarma en máquinas agrícolas: Tr. ONG DESEO. - M., 101-118.

Mellmann, Jochen; & Hoffmann, Thomas (2014). Para la mayor parte de los materiales agrícolas a granel, por ejemplo, Tecnología en polvo Volumen: 253. 46-52 Publicado: FEB 2014

Mironov M.A. (2010). Modelado matemático del proceso de secado de una capa de grano en movimiento en el modo de inversión: dis. Cand. de esos ciencias Krasnodar: Universidad Tecnológica del Estado de Kuban.

Mukhanov N.V., Marchenko S.A., Voronkov V.V., Shevyakov A.N. y Tikhonov E.A. (2016). Estudios experimentales del proceso tecnológico del reciclaje del secador de granos tipo bunker // Recursos y Tecnología.T. 13. No. 4. 93-105.

Ospanov A. B., Budnikov D. A., Karmanov D. K., Vasilyev A. A., Baimuratov D.Sh., Toksanbaeva B.O. y Shalginbaev D. B. (2017). Mejora del proceso de secado y desinfección del grano en el campo de microondas. Almaty: Nur-Print.

Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Britikov D.A. y Tertychnaya T.N. (2009). Modelado del proceso de secado de grano en una capa de movimiento gravitacional en un silo. Silos de grano / Actas de las universidades. Tecnología alimentaria. № 5-6. 81-84.

Ospanov A.B., Vasilyev A.N., Budnikov D.A., Karmanov D.K., Vasilyev A.A. et al. (2014). Proceso de inmunización en el campo de las micro ondas. Al-maty: Nur-Print.

Tishaninov K.N. (2015). Teoría de la interacción de partículas de un flujo de grano / ciencia en Rusia Central. №1 (13). 76-87.

Vasilyev A.N., Budnikov D.A., Vasilyev A.A., Rotachev Yu.Yu. y Gusev V.G. (2014). Planta modular para procesamiento de grano. Maquinaria y tecnología agrícola. No. 5. 27-30.

Vasiliev, A.N., Budnikov, DA, Gracheva, N.N. y Severinov O.V. (2016). Mejora de la tecnología de secado de grano en una capa densa mediante ingeniería eléctrica, sistemas de control automatizados y modelado de procesos. M.: Institución educativa presupuestaria del estado federal, Centro de investigación federal VIM.

Vasiliev A.N., Budnikov D.A. y Vasiliev A.A. (2017). Un modelo informático de transferencia

de calor - humedad en la capa de grano con un efecto convectivo de microondas. Boletín de Ingeniería del Don, №3 [http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive / N3y2017 / 4310](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4310).

Volkhonov M.S. (2007). Justificación y mejora de procesos y dispositivos de varita para el procesamiento de granos postcosecha: autor. dis. ... Dr. Techn. ciencias Kostroma.